

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

А.Б. Красовский

**Исследование на модели  
режимов работы  
тиристорных преобразователей  
в электроприводе**

*Методические указания  
к лабораторной работе по курсам  
«Основы электропривода» и «Электропривод,  
управление и автоматизация АММА»*

Москва

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

2012

УДК 621.314  
ББК 31.264.5  
К78

Рецензент *Е.Н. Енин*

**Красовский А.Б.**  
К78 Исследование на модели режимов работы тиристорных преобразователей в электроприводе : метод. указания к лабораторной работе по курсам «Основы электропривода» и «Электропривод, управление и автоматизация АММА» / А.Б. Красовский. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 39, [5] с. : ил.

Представлены математический пакет MATLAB и его приложения для визуального моделирования силовых электрических устройств. На примере однофазной однополупериодной схемы выпрямления рассмотрены принципы построения моделей тиристорных преобразователей. Показаны особенности работы многофазных преобразователей в выпрямительном и инверторном режимах с нагрузкой в виде якорной цепи двигателей постоянного тока, а также построенных на их основе непосредственных преобразователей частоты для управления асинхронными двигателями. Приведены основные теоретические сведения по указанным разделам курсов и задание для выполнения работы.

Для студентов 4-го и 5-го курсов факультетов МТ и КК МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Рекомендовано Учебно-методической комиссией НУК ФН МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 621.314  
ББК 31.264.5

**Цель работы** — знакомство с общими принципами создания и настройки имитационных моделей силовых электротехнических устройств в пакете MATLAB и изучение на этой основе физических особенностей функционирования, основных схем, режимов работы и характеристик тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного и переменного тока.

## ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Тиристорные преобразователи (ТП) на основе однооперационных тиристорov широко используют в системах управления современных электроприводов постоянного и переменного тока. В электроприводах постоянного тока на их базе выполняют нереверсивные и реверсивные преобразователи переменного напряжения в регулируемое постоянное напряжение для питания якорных цепей и обмоток возбуждения двигателей постоянного тока. Такие преобразователи обычно сокращенно называют *АС–DC-преобразователями*. Выражение образовано от начальных букв английских слов, обозначающих род тока на их входе и выходе: *alternating current* (переменный ток) и *direct current* (постоянный ток).

В электроприводах переменного тока ТП преимущественно применяют в преобразователях частоты с непосредственной связью (циклоконверторах) для реализации частотного управления мощными асинхронными двигателями. По аналогии с предыдущими преобразователями их называют *АС–АС-преобразователями*.

### 1. Нереверсивные тиристорные АС–DC-преобразователи

ТП состоят из двух основных частей: вентильной группы (ВГ), которая через силовой трансформатор подключена к промышленной сети с напряжением  $U_c$ , и системы импульсно-фазового управ-

ления (СИФУ), как показано на рис. 1. Вентильная группа ТП осуществляет преобразование электрической энергии, поступающей из сети переменного тока, в электрическую энергию постоянного тока на выходе (в режиме выпрямителя) либо электрической энергии постоянного тока, вырабатываемой электрической машиной, в энергию переменного тока (в режиме инвертора). Силовой трансформатор служит для согласования входного и выходного напряжений преобразователя. Одновременно трансформатор разделяет электрически питающую сеть и цепь нагрузки преобразователя (обеспечивает их гальваническую развязку).

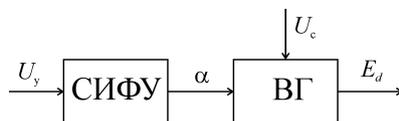


Рис. 1

СИФУ обеспечивает формирование управляющих импульсов на тиристоры вентильной группы, причем временная задержка или фазовый сдвиг этих импульсов относительно анодного напряжения на тиристорах изменяется в зависимости от напряжения управления  $U_y$ .

Схемы силовой части *нереверсивных ТП* строят по тем же принципам, что и неуправляемых выпрямителей на диодах, подробно изученных в соответствующих разделах курса электротехники и электроники. К основным показателям, определяющим выбор схемы преобразователя, относят его стоимость, массу и размеры, форму кривой выходного напряжения и т. д. По совокупности показателей в настоящее время наибольшее распространение получили трехфазные мостовые схемы ТП (рис. 2, а). В электроприводах небольшой мощности иногда используют однофазные мостовые преобразователи (рис. 2, б). Мостовые схемы ТП образованы последовательным соединением двух групп вентилей  $VD1, VD4$  и  $VD2, VD3$  в однофазной схеме и  $VD1, VD3, VD5$  и  $VD2, VD4, VD6$  в трехфазной схеме. Причем в одной из них соединены аноды тиристоров (анодная группа), а в другой — катоды (катодная группа).

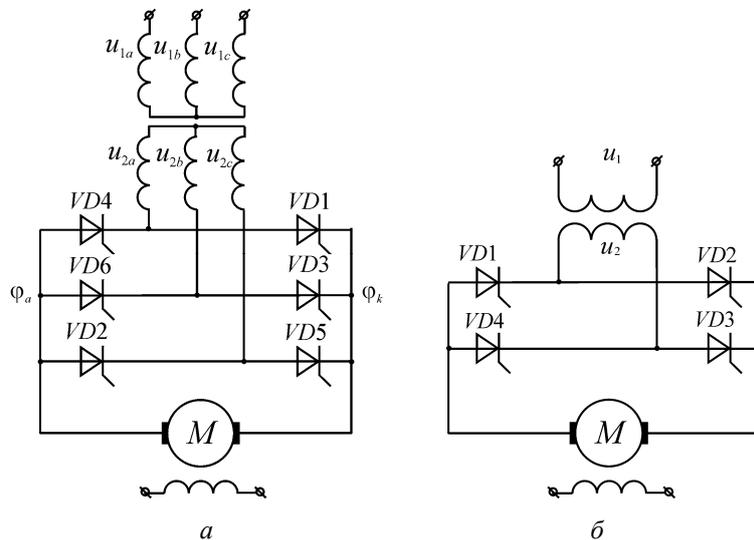


Рис. 2

*Выпрямительный режим* является основным для ТП в электроприводе: электрическая энергия переменного тока преобразуется в энергию постоянного тока. Напомним, что нагрузка ТП — якорная цепь двигателя постоянного тока — на эквивалентной схеме может быть представлена последовательным соединением резистора с сопротивлением, равным суммарному активному сопротивлению якорной цепи  $R_{\Sigma}$ , суммарной индуктивности  $L_{\Sigma}$ , а также ЭДС движения  $E$  с полярностью, противоположной полярности напряжения источника питания. Такой вид нагрузки обычно называют активно-индуктивной нагрузкой с противоЭДС.

Наиболее характерные особенности работы ТП на активно-индуктивную нагрузку с противоЭДС удобно рассмотреть на примере простейшей *однофазной однополупериодной схемы* (рис. 3). Напомним, что моменты времени, когда потенциал анода каждого тиристора становится выше потенциала его катода, называют моментами естественного открывания тиристоров. Относительно положений точек естественного открывания тиристоров на временных диаграммах отсчитывают временные или фазовые сдвиги прихода управляющих импульсов на тиристоры при регулировании выходного напряжения преобразователя.

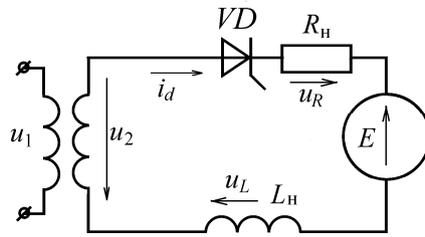
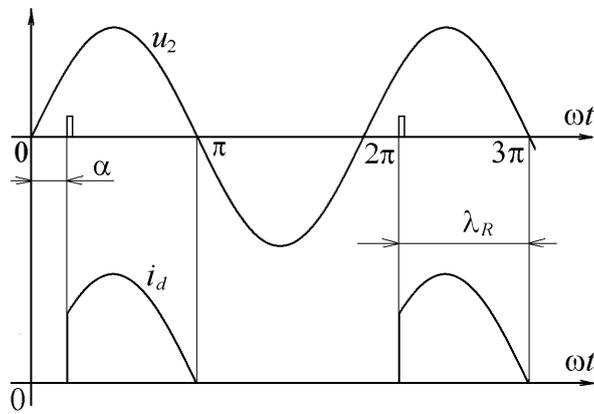
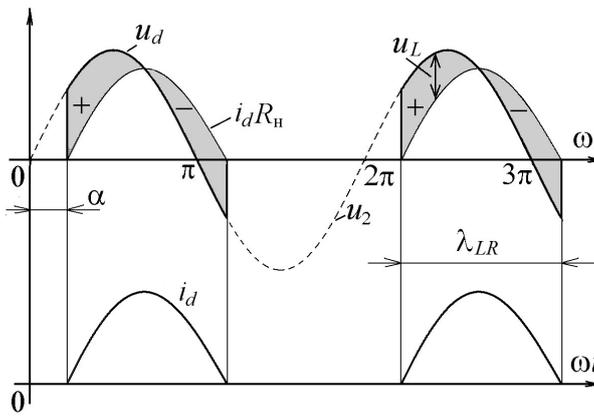


Рис. 3



a



б

Рис. 4

Работе преобразователя (см. рис. 3) на *активную нагрузку* соответствуют временные диаграммы, приведенные на рис. 4, а. На угловых интервалах  $0 - \pi$ ,  $2\pi - 3\pi$ , ... к тиристор  $VD$  приложена положительная полуволна напряжения  $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$ , создаваемого вторичной обмоткой трансформатора, поэтому моментам естественного открывания тиристора  $VD$  соответствуют точки  $0$ ,  $2\pi$ ,  $4\pi$  и т. д. При задержке управляющих импульсов на фазовый угол  $\alpha$  относительно этих точек в моменты, соответствующие углам  $\alpha$ ,  $2\pi + \alpha$ , ..., он открывается. Через открытый тиристор на нагрузку подается напряжение  $u_d$  в виде импульсов положительной полярности, которые на угловых интервалах  $\alpha \dots \pi$ ,  $(2\pi + \alpha) \dots 3\pi$ , ... повторяют кривую напряжения  $u_2$ . При активной нагрузке характер изменения выходного тока преобразователя  $i_d$  по форме повторяет изменение напряжения  $u_d$  (рис. 4, а). При  $\omega t = \pi$ ,  $3\pi$ , ... напряжение на тиристоре становится равным нулю и он закрывается.

Среднее за период значение выходного напряжения для однополупериодной схемы преобразователя при активной нагрузке определяется интегралом

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{2\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (1)$$

где  $U_{d0} = \frac{U_{2m}}{2\pi} = 0,45U_2$  — среднее значение напряжения на нагрузке при  $\alpha = 0$ ;  $U_2$  — действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

При *активно-индуктивной нагрузке* условие открывания тиристора  $VD$  в рассматриваемой схеме остается тем же, что и в предыдущем случае, — он открывается с приходом управляющего импульса при положительном напряжении между анодом и катодом. Как показано на временной диаграмме (рис. 4, б), с приходом управляющего импульса на тиристор с задержкой на угол  $\alpha$  тиристор открывается и к нагрузке прикладывается положительная полуволна напряжения  $u_2$ . Под действием этого напряжения ток  $i_d$  начинает нарастать. При этом в индуктивности нагрузки  $L_n$  наводится напряжение самоиндукции  $u_L = L_n \frac{di_d}{dt}$ . Пока напряжение  $u_2$

превышает падение напряжения на активном сопротивлении нагрузки  $u_R = i_d R_n$ , ток  $i_d$  нарастает, поэтому напряжение на индуктивности  $u_L$  положительно:

$$u_L = u_2 - i_d R_n = L_n \frac{di_d}{dt} > 0. \quad (2)$$

На этом этапе в индуктивности  $L_n$  накапливается электромагнитная энергия, а наводимое напряжение  $u_L$  препятствует нарастанию тока  $i_d$ .

По мере уменьшения разницы между  $u_2$  и  $u_R$  темп увеличения тока  $i_d$  замедляется, и в момент наступления равенства этих напряжений он достигает максимального значения, а напряжение на индуктивности  $u_L$  оказывается равным нулю. Далее напряжение  $u_R$  превышает напряжение  $u_2$ , поэтому ток  $i_d$  спадает, а напряжение на индуктивности  $u_L$  изменяет знак:

$$u_L = u_2 - i_d R_n = L_n \frac{di_d}{dt} < 0. \quad (3)$$

На этом этапе напряжение  $u_L$  препятствует спаданию тока  $i_d$ , а индуктивность  $L_n$  отдает запасенную ранее электромагнитную энергию, которая наряду с энергией, потребляемой из источника питания, выделяется в виде теплоты на активном сопротивлении нагрузки  $R_n$ . При достижении напряжением  $u_2$  нулевого значения ток  $i_d$  поддерживается напряжением  $u_L$ , т. е. исключительно за счет энергии, накопленной в индуктивности  $L_n$ . Далее при изменении знака напряжения  $u_2$  протекание тока  $i_d$  в прежнем направлении обеспечивается разностью напряжений  $u_L$  и  $u_2$ .

Поскольку на этом этапе ток  $i_d$  направлен против изменившегося знака напряжения  $u_2$ , часть электромагнитной энергии, запасенной ранее в индуктивности  $L_n$ , рекуперировать в источник питания. Протекание тока  $i_d$  в нагрузке прекращается после того, как весь запас электромагнитной энергии в индуктивности  $L_n$  исчерпан. Этому условию отвечает равенство площадей затененных криволинейных треугольников на рис. 4, б. Далее процессы повторяются.

Как видно, при активно-индуктивной нагрузке угловой интервал протекания тока  $\lambda_{LR}$  превышает интервал  $\lambda_R$  при активной нагрузке (сравните рис. 4, а и б). При этом в выходном напряже-

нии преобразователя появляются отрицательные импульсы, т. е. выходной ток протекает через нагрузку при отрицательном сетевом напряжении. Очевидно, что с ростом индуктивности  $L_n$  амплитуда импульса тока  $i_d$  снижается, а длительность  $\lambda_{LR}$  возрастает.

Теперь рассмотрим *влияние постоянной противоЭДС* в цепи нагрузки на работу преобразователя. На временных диаграммах отсчет значений углов управления тиристора  $\alpha$  будем вести от тех же положений, что и в предыдущих случаях. Тогда тиристор может быть открыт только в диапазоне изменения угла  $\alpha$  между некоторыми минимальным  $\alpha_{\min}$  и максимальным  $\alpha_{\max} = \pi - \alpha_{\min}$  значениями, определяемыми равенством напряжения  $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$  и противоЭДС  $E$  (в точках а и б на рис. 5, а). Это объясняется тем, что внутри этого диапазона напряжение на тиристоре положительное, а вне его — отрицательное.

С приходом управляющих импульсов при  $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$  тиристор открывается. Если цепь нагрузки кроме противоЭДС содержит лишь активное сопротивление, ток нагрузки  $i_d$  повторяет по форме разность напряжения  $u_2$  и противоЭДС  $E$  (см. рис. 5, а). Как только напряжение на тиристоре будет отрицательным (правее точки б на рисунке), он закрывается и ток  $i_d$  становится равным нулю. Таким образом, при рассматриваемых условиях наличие постоянной противоЭДС в цепи нагрузки приводит к уменьшению угловой длительности интервала протекания выходного тока ТП  $\lambda_{RE}$  по сравнению с длительностью аналогичного интервала  $\lambda_R$  в случае активной нагрузки при одинаковом значении угла управления  $\alpha$  и прочих равных условиях (сравните рис. 5, а и рис. 4, а).

Если же нагрузка кроме активного сопротивления и противоЭДС содержит еще и индуктивность, то моменты отключения тиристора по причинам, рассмотренным выше, сдвигаются в сторону запаздывания относительно их положений при нагрузке без индуктивности. Тогда угловая длительность импульса тока  $\lambda_{LRE}$  становится больше длительности импульса тока  $\lambda_{RE}$  при активной нагрузке с противоЭДС (сравните рис. 5, а и б). Таким образом, индуктивность и противоЭДС в цепи нагрузки рассматриваемого ТП изменяют длительность проводящего состояния тиристора по сравнению с длительностью при чисто активной нагрузке, причем индуктивность ее увеличивает, а противоЭДС, наоборот, уменьшает.



рицательная. Аналогично этому на угловых интервалах  $\pi - 2\pi$ ,  $3\pi - 4\pi$ , ... к тиристорам  $VD2$  и  $VD4$  прикладывается положительная полуволна напряжения  $u_2$ , а к тиристорам  $VD1$  и  $VD3$  — отрицательная. Таким образом, на временных диаграммах (рис. 6) моментам естественного открывания тиристоров  $VD1$  и  $VD3$  соответствуют точки  $0, 2\pi, 4\pi, \dots$ , а тиристоров  $VD2$  и  $VD4$  — точки  $\pi, 3\pi, \dots$ .

С приходом управляющих импульсов в моменты времени, соответствующие углам  $\alpha, 2\pi + \alpha, \dots$ , открываются тиристоры  $VD1$  и  $VD3$ , а в моменты, соответствующие углам  $\pi + \alpha, 3\pi + \alpha, \dots$ , — тиристоры  $VD2$  и  $VD4$ . На рис. 6, а показаны импульсы выходного тока  $i_d$  преобразователя при работе на активную нагрузку, по форме повторяющие напряжение  $u_d$ .

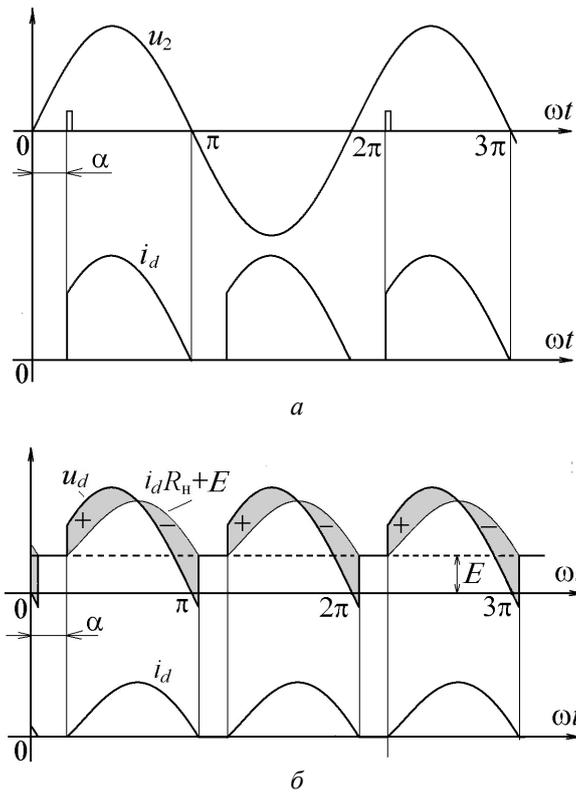


Рис. 6 (начало)

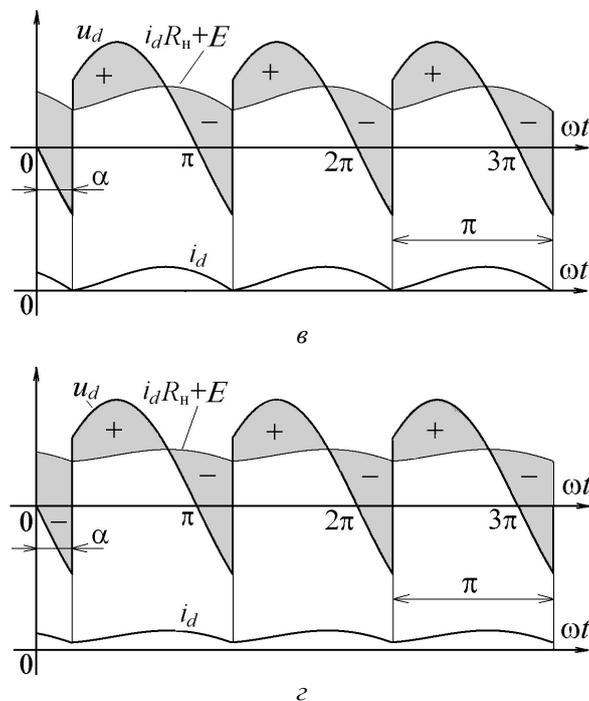


Рис. 6 (окончание)

Видно, что с момента закрытия предыдущей пары тиристоров и до открытия последующей пары в пределах углового интервала  $\alpha$  все тиристоры закрыты и напряжение на нагрузке равно нулю. Поэтому в нагрузке, как и в однополупериодной схеме ТП, существует бестоковая пауза, иначе говоря, по форме ток  $i_d$  является прерывистым. Однако длительность бестоковых пауз из-за более высокой частоты импульсов тока в мостовой схеме меньше.

Среднее за период значение выходного напряжения однофазного мостового ТП при активной нагрузке определяется по выражению, аналогичному (1), однако среднее значение напряжения на нагрузке при  $\alpha = 0$  для этой схемы вдвое больше, т. е.  $U_{d0} = 2U_{2m} / \pi = 0,9U_2$ . Зависимость  $U_d / U_{d0}$  от угла  $\alpha$  называют *регулирующей* характеристикой ТП. При работе на активную нагрузку ее вид показан на рис. 7 (кривая 1).

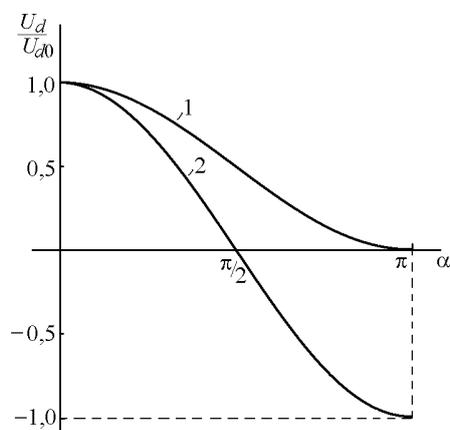


Рис. 7

При работе мостовой схемы ТП на активно-индуктивную нагрузку с противоЭДС возможны разные режимы. В режиме *прерывистого тока* ток нагрузки  $i_d$  представляет собой последовательность импульсов, разделенных бестоковыми паузами, как показано на рис. 6, б. Однако из-за возросшей в 2 раза частоты их следования по сравнению с однополупериодной схемой в мостовой схеме при прочих равных условиях нулевые паузы в токе  $i_d$  имеют меньшую длительность. Как и ранее, наличие этих пауз объясняется тем, что в каждом импульсе тока  $i_d$  энергии, накапливаемой в индуктивности на этапе нарастания, недостаточно для его поддержания при спаде до открывания следующей пары тиристоров.

С увеличением индуктивности нагрузки накапливаемая в ней энергия возрастает, и при некотором значении в мостовой схеме ТП наступает *границный режим*. В этом режиме, иллюстрируемом временными диаграммами на рис. 6, в, энергия, запасаемая в индуктивности на этапе нарастания тока  $i_d$ , полностью оказывается израсходованной при его спаде. Ток  $i_d$  достигает нулевого значения в момент открывания следующей пары тиристоров, поэтому нулевые паузы в кривой выходного тока исчезают.

Несмотря на задержку включения на угол  $\alpha$  относительно моментов естественного открывания, длительность протекания тока  $i_d$  через каждую пару тиристоров становится равной половине периода

изменения сетевого напряжения. При дальнейшем увеличении индуктивности в цепи нагрузки наступает третий режим работы ТП — режим *непрерывного тока* (см. рис. 6, з). В этом режиме очередная пара тиристорov включается раньше, чем ток  $i_d$  достигает нулевого значения, в результате он вновь начинает нарастать. Поэтому выходной ток ТП не содержит нулевых пауз, т. е. непрерывен.

При значительной индуктивности в цепи нагрузки пульсации выходного тока преобразователя незначительны, а наличие там дополнительной постоянной противоЭДС практически не изменяет режима работы ТП. Объясняется это тем, что при указанных условиях противоЭДС на эквивалентной схеме можно условно заменить равным падением напряжения на дополнительном резисторе. Обычно для упрощения анализа работы ТП принимают индуктивность в цепи нагрузки  $L_n$  равной бесконечности, а влияние конечного значения индуктивности на работу преобразователя при необходимости рассматривают отдельно.

Наличие отрицательных импульсов в кривой выходного напряжения преобразователя ведет к тому, что среднее значение выходного напряжения преобразователя  $U_d$  становится меньше, чем при активной нагрузке и одинаковом значении угла регулирования  $\alpha$ . Уравнение для регулировочной характеристики ТП в режиме непрерывного тока нагрузки имеет вид

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{\pi} \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha. \quad (4)$$

Из сравнения выражений (1) и (4) видим, что регулировочная характеристика преобразователя при активно-индуктивной нагрузке отличается от аналогичной характеристики при активной нагрузке. Ее вид показан на рис. 7 (кривая 2). Наиболее значимым является то, что среднее значение выходного напряжения в рассматриваемом случае равно нулю при  $\alpha = \pi/2$ , а при  $\alpha > \pi/2$  изменяет знак и становится отрицательным. Отсюда следует важный вывод: при наличии индуктивности в цепи нагрузки изменением угла регулирования преобразователя  $\alpha$  можно регулировать выходное напряжение по значению и знаку.

Трехфазная мостовая схема ТП подключается к сети через трехфазный трансформатор, у которого первичные и вторичные

обмотки могут быть соединены как в треугольник, так и в звезду. Временная диаграмма фазных напряжений вторичных обмоток трансформатора  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  показана в верхней части рис. 8. Точки естественного открывания тиристоры катодной группы помечены цифрами 1, 3, 5, 7, а анодной группы соответственно 2, 4, 6, 8.

Вначале рассмотрим работу преобразователя при  $\alpha = 0$ , т. е. когда управляющие импульсы на тиристоры  $VD1 - VD6$  приходят в моменты их естественного открывания (рис. 8). В каждый момент времени ток проводят два тиристора — один из катодной группы и один из анодной. В катодной группе в проводящем состоянии находится тиристор, у которого напряжение на аноде наиболее положительно, а в анодной — на катоде наиболее отрицательно. Поскольку моменты естественного открывания тиристоры катодной и анодной групп не совпадают, для работы мостовой схемы необходимо подавать на вентили управляющие импульсы длительностью более  $\pi/3$  или вдвоенные импульсы с интервалом  $\pi/3$ .

Через два открытых тиристора нагрузка подключается на линейное напряжение, например, при работе  $VD1$  и  $VD6$  на напряжение  $u_{ab}$ , затем, когда тиристор  $VD6$  закрывается, а  $VD2$  открывается, — на напряжение  $u_{ac}$  и т. д. (см. рис. 8). Таким образом, выходное напряжение  $u_d$  имеет амплитуду линейного напряжения на вторичных обмотках трансформатора. При этом длительность открытого состояния каждого тиристора составляет  $2\pi/3$ , остальную часть времени он закрыт обратным напряжением, состоящим из частей соответствующих линейных напряжений.

Диаграмма изменения напряжения на нагрузке  $u_d$  имеет вид, как в нижней части рис. 8. Обратим внимание на то, что у кривой  $u_d$  есть шесть пульсаций за один период изменения питающего напряжения, их амплитуда существенно меньше, чем в однофазных преобразователях, поэтому они легче поддаются фильтрации.

При  $\alpha \neq 0$  в режиме непрерывного тока кривая выходного напряжения складывается из отрезков синусоид линейного напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Временные диаграммы напряжения на нагрузке при разных значениях угла  $\alpha$  показаны на рис. 9. При  $\alpha < 60^\circ$  мгновенное значение выходного напряжения преобразователя не изменяет знака и не достигает нуля, поэтому поддерживается режим непрерывного выходного тока независимо от характера нагрузки — активной или активно-индуктивной.

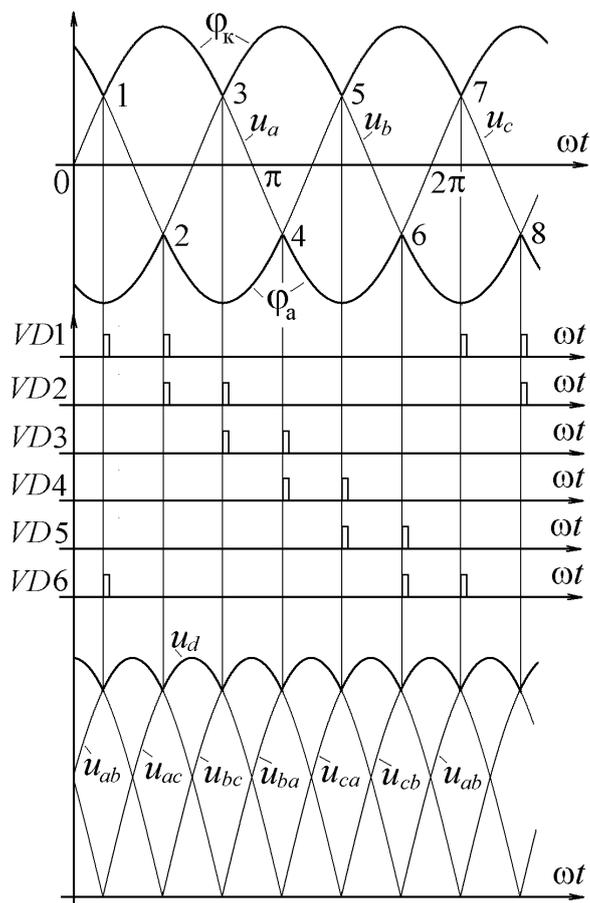


Рис. 8

При  $\alpha > 60^\circ$  в кривой выходного напряжения преобразователя появляются отрицательные участки, следовательно, при недостаточной индуктивности нагрузки возможен режим прерывистого выходного тока. Далее с ростом угла управления  $\alpha$  длительность отрицательных участков возрастает, благодаря чему при  $\alpha = 90^\circ$  среднее значение выходного напряжения  $U_d$  достигает нуля, а при  $\alpha > 90^\circ$  меняет знак — становится отрицательным.

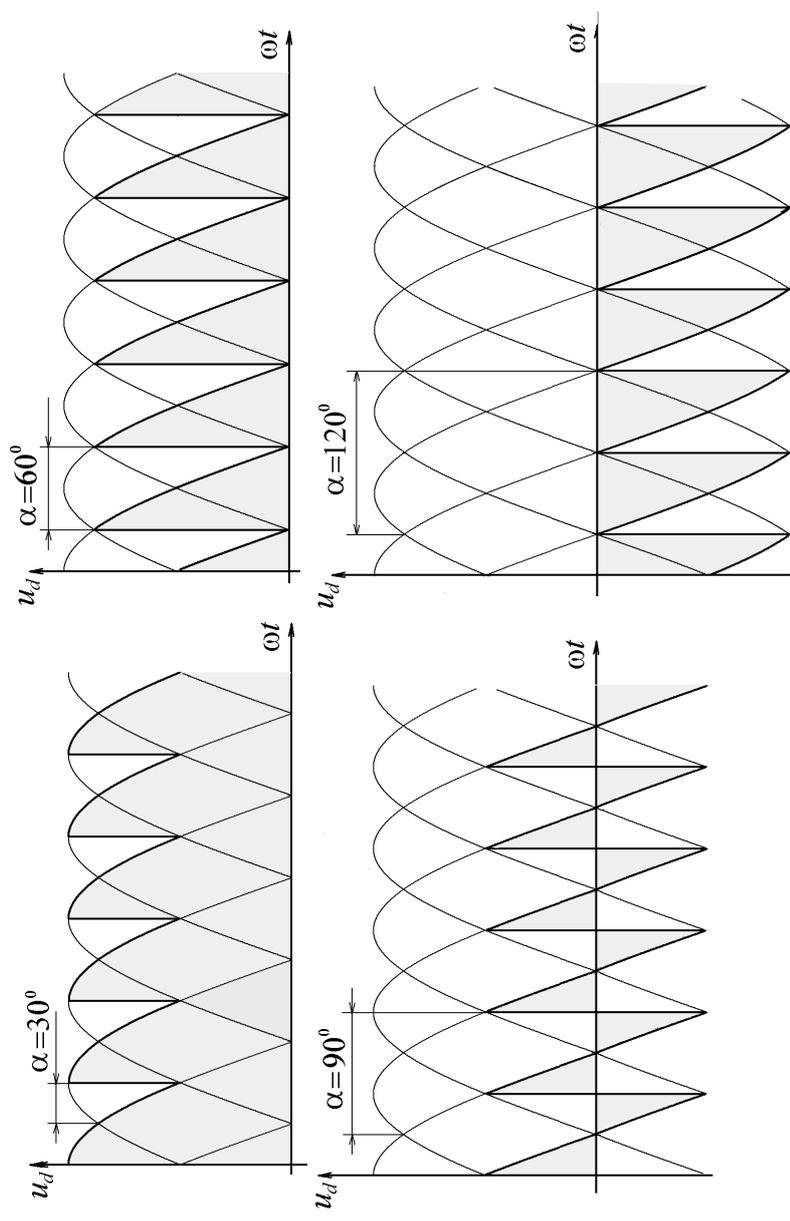


Рис. 9

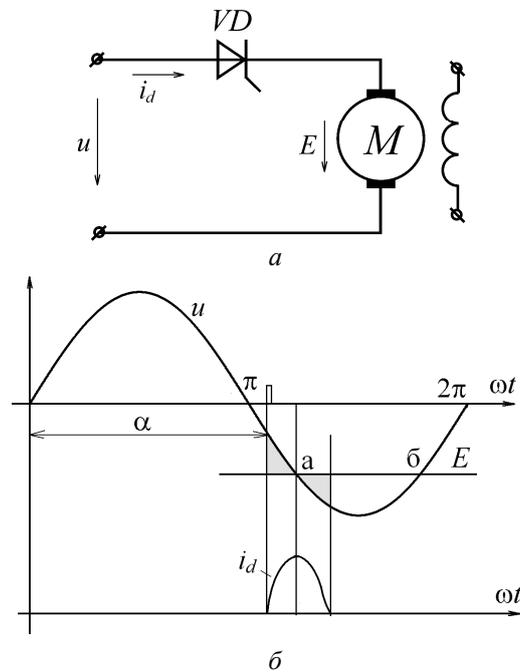


Рис. 10

В инверторном режиме ТП выполняет функцию, обратную выпрямительному режиму, т. е. преобразует электрическую энергию постоянного тока в энергию переменного тока и передает ее в сеть переменного тока. Поскольку электрические параметры преобразователя на стороне переменного напряжения определяются параметрами сети, такие инверторы называют *зависимыми* или *ведомыми сетью*. Принцип действия ведомого сетью инвертора рассмотрим на примере простейшей *однофазной однополупериодной* схемы с нагрузкой в виде якорной цепи машины постоянного тока (рис. 10, а).

Полярность включения тиристора  $VD$  в схеме на рис. 10, а по отношению к наводимой в якоре электрической машины ЭДС выбираются так: в инверторном режиме машина постоянного тока работает генератором электрической энергии, поэтому протекающий через якорную цепь ток и наводимая в ней

ЭДС должны совпадать по направлению. Соответственно для того чтобы сеть была приемником энергии, необходимо проводящее состояние тиристора обеспечить при отрицательной полуволне напряжения. Эти условия определяют возможные положения управляющего импульса по отношению к кривой сетевого напряжения.

В частности, если принять взаимное расположение графиков сетевого напряжения и наводимой ЭДС движения, как показано на рис. 10, б, то очевидно, что управляющий импульс должен располагаться левее точки а, поскольку тиристор  $VD$  может открыться только когда потенциал его анода выше потенциала катода. Возможны разные варианты положения управляющего импульса относительно кривой сетевого напряжения. В случае, показанном на рис. 10, б, он располагается между точками  $\pi$  и а. От момента прихода импульса и до точки а, где мгновенное значение напряжения сети достигает значения ЭДС движения, ток нарастает, а индуктивность якорной цепи запасает энергию.

Если для упрощения принять сопротивление якорной цепи генератора достаточно малым, можно считать, что в точке а ток  $i_a$  достигает максимального значения и далее, поддерживаемый запасенной в индуктивности электромагнитной энергией, убывает. Как только весь запас энергии будет исчерпан, что определяется равенством площадей затененных областей на рис. 10, б, расположенных левее и правее точки а, ток  $i_a$  достигает нулевого значения, и тиристор закрывается. Заметим, что с момента, соответствующего точке б, напряжение на тиристоре вновь становится положительным. *Поскольку в этом случае весь импульс тока приходится на отрицательную полуволну сетевого напряжения, в течение всего проводящего состояния тиристора обеспечивается режим инвертирования.*

Для увеличения амплитуды и длительности протекания тока в рассматриваемой цепи и соответственно увеличения инвертируемой энергии управляющий импульс необходимо дополнительно смещать влево. Приход управляющего импульса до изменения полярности сетевого напряжения, т. е. левее точки  $\pi$ , определяет второй вариант его положения относительно синусоиды. При этом от момента прихода управляющего импульса и до точки  $\pi$  ток в цепи протекает под действием и сетевого

напряжения, и ЭДС генератора. Инвертирование на этом этапе невозможно. Здесь энергия обоих источников за вычетом потерь запасается в индуктивности. Режим инвертирования наступает, как только сетевое напряжение, достигнув нуля, меняет знак.

Однако важно отметить, что при некотором максимальном смещении управляющего импульса влево относительно точки а наступает граничный режим работоспособности схемы, при котором импульс тока продлевается до момента, соответствующего точке б. Если же запас энергии в индуктивности будет таков, что к этому моменту времени она не успеет полностью израсходоваться, ток не достигнет нулевого значения в точке б и тиристор не выключится, а ток после точки б начнет вновь нарастать. Такой режим работы ТП является аварийным и получил название *опрокидывание инвертора*. В реальных условиях на восстановление запирающих свойств необходим некоторый интервал времени, поэтому тиристор должен выключаться несколько ранее, чем сетевое напряжение достигнет точки б.

Таким образом, для того чтобы ТП перешел из режима выпрямления в режим инвертирования, необходимо при неизменной полярности подключения тиристора изменить полярность подключения источника постоянной ЭДС и соответствующим образом выбрать угол управления  $\alpha$ . При этом контур протекания тока должен содержать индуктивность в цепи нагрузки.

В рассмотренной выше простейшей однополупериодной схеме практически невозможно реализовать режим непрерывного тока, поэтому используют, как минимум, однофазные двухполупериодные схемы, а чаще многофазные, из которых наиболее распространены трехфазные схемы. В качестве примера рассмотрим временную диаграмму и некоторые особенности работы *однофазной мостовой схемы* (см. рис. 2, б) в инверторном режиме.

В этой схеме при достаточно большой индуктивности в цепи нагрузки изменение напряжения  $u_2$  практически не влияет на ток. Переменная составляющая напряжения, обусловленная разностью напряжения  $u_2$  и постоянной ЭДС, прикладывается к индуктивности, изменением тока нагрузки можно пренебречь. Для обеспечения инверторного режима угол управления  $\alpha$  должен быть больше  $\pi/2$ .

Временные диаграммы, поясняющие работу схемы, показаны на рис. 11. На интервале  $0-\alpha$  проводят ток тиристоры  $VD2, VD4$ . Отрицательная полуволна напряжения вторичной обмотки трансформатора  $u_2$  через них подается в нагрузку. В момент времени, соответствующий углу  $\alpha$ , на тиристоры  $VD1, VD3$  подаются управляющие импульсы. Так как в этот момент потенциал их анода выше потенциала катода, они открываются. Ток нагрузки  $i_d$  переключается на эти тиристоры, а тиристоры  $VD2, VD4$  закрываются обратным напряжением сети. На интервале  $\alpha \dots \pi$  полярность напряжения  $u_2$  положительна и совпадает с полярностью ЭДС  $E$ . Здесь режима инвертирования нет. На интервале  $\pi \dots \pi + \alpha$  полярность напряжения  $u_2$  отрицательна и ток  $i_d$  протекает под действием ЭДС  $E$  против напряжения  $u_2$ , т. е. якорная цепь машины является источником, а вторичная обмотка трансформатора и соответственно сеть — приемником электрической энергии.

При открывании тиристоров  $VD2, VD4$  (угол  $\pi + \alpha$ ) обратным напряжением сети тиристоры  $VD1, VD3$  закрываются, и ток нагрузки вновь переключается на  $VD2, VD4$ . Интервал проводимости также складывается из двух участков. На первом участке до точки  $2\pi$  напряжение  $u_2$  положительно и ток  $i_d$  протекает под действием напряжения  $u_2$  и совпадающей по направлению ЭДС  $E$ , на втором этапе при изменении полярности  $u_2$  наступает режим инвертирования. Далее процессы повторяются. Таким образом, на большей части проводящего состояния тиристоров преобразователя происходит передача энергии от электрической машины, действующей как генератор, в сеть переменного тока. Следует обратить внимание на то, что ток вторичной обмотки трансформатора  $i_2$  имеет прямоугольную форму.

Теоретически режим инвертирования в пределах каждого импульса тока может простирается до точек с координатами  $\pi, 2\pi, 3\pi$  и т. д. Однако реально при подаче управляющих импульсов на тиристоры в этих точках не выполняются условия запирания ранее проводивших ток тиристоров (обратное напряжение на них равно нулю) и они остаются во включенном состоянии. Наступает режим опрокидывания инвертора, для исключения которого в инверторном режиме ограничивают максимальное значение угла управления  $\alpha_{\max}$ .

При анализе инверторного режима работы ТП часто оперируют не углами управления  $\alpha$ , а углами опережения управления  $\beta$ , дополняющими значение  $\alpha$  до  $\pi$  (см. рис. 11), т. е.

$$\beta = \pi - \alpha. \quad (5)$$

Рассмотренное выше ограничение угла регулирования по отношению к углу опережения определяет его минимальное значение  $\beta_{\min} = \pi - \alpha_{\max}$ , которое с учетом необходимого временного интервала на восстановление запирающих свойств тиристоров обычно выбирают в пределах  $10 \dots 15^\circ$ .

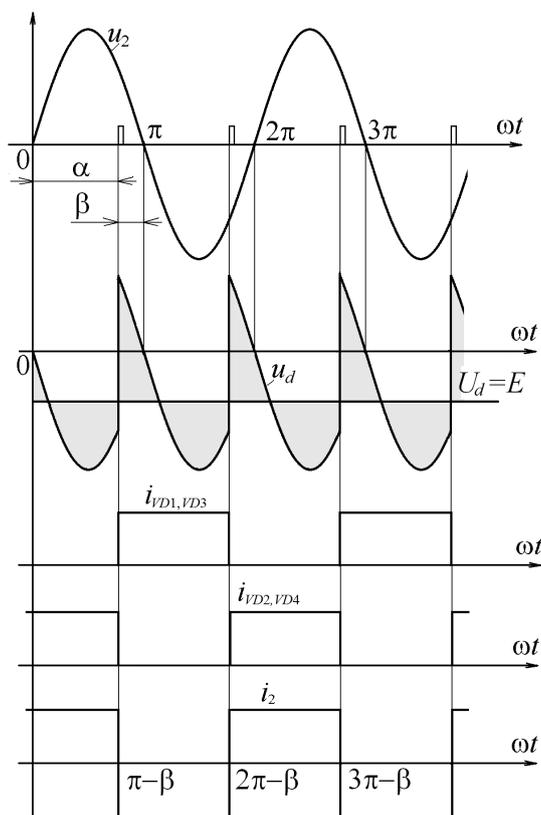


Рис. 11

Объединив выражения (4) и (5), получаем уравнение регулировочной характеристики инвертора в виде зависимости среднего значения напряжения на его выходе  $U_{dн}$  от угла  $\beta$

$$U_{dн} = U_{d0} \cos(\pi - \beta) = -U_{d0} \cos \beta. \quad (6)$$

Для надежного закрывания тиристоров ограничивают минимальное значение угла опережения включения тиристоров  $\beta_{\min}$  в пределах  $10 \dots 15^\circ$ .

## 2. Реверсивные тиристорные AC-DC-преобразователи

Реверсивные ТП обеспечивают изменение полярности выходного напряжения и протекание тока в нагрузке в обоих направлениях. Как правило, их получают из двух нереверсивных ТП, образующих две группы вентилях, включенных на общую нагрузку таким образом, что каждый обеспечивает протекание тока в одном направлении. На рис. 12, а показана упрощенная схема реверсивного ТП, где группа вентилях нереверсивного преобразователя В обеспечивает протекание тока в нагрузке  $i_B$  в условном направлении «вперед», а группа вентилях преобразователя Н — тока  $i_H$  в направлении «назад».

Наибольшее распространение получили *встречно-параллельные* схемы реверсивных преобразователей. В них обе группы вентилях В и Н могут питаться от общего комплекта вторичных обмоток трансформатора. В качестве примера на рис. 12, б показана встречно-параллельная схема реверсивного ТП, в которой группы вентилях В и Н собраны по трехфазной мостовой схеме.

Управление группами вентилях в реверсивном ТП может быть *раздельным* и *совместным*. При *раздельном* управлении импульсы подают только на группу, проводящую ток нужного направления. При *совместном* управлении на одну группу вентилях подают импульсы с необходимым углом управления, обеспечивая нужные значение и направление тока в нагрузке, другая группа вентилях при этом переводится в инверторный режим.

Особенностью совместного управления реверсивным ТП является возможность появления контура замыкания так называемого *уравнительного тока*  $i_{ур}$ , протекающего через силовые цепи обоих

нереверсивных преобразователей, минуя нагрузку (см. рис. 12, а). Этот ток из-за малого сопротивления выходных цепей ТП даже при незначительной суммарной ЭДС, совпадающей с проводящим направлением вентилей, может быть достаточно большим. Уравнительный ток дополнительно нагружает преобразователь, снижает КПД и может вызвать перегрев и даже выход ТП из строя.

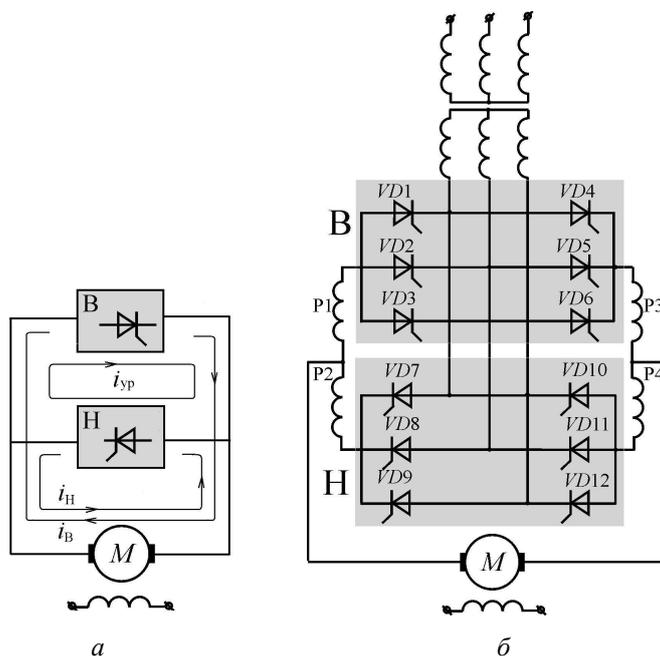


Рис. 12

Наиболее опасен непрерывный уравнительный ток. Для его устранения необходимо уравнивать средние значения напряжений на выходе выпрямительной и инверторной групп. Такое управление реверсивным ТП получило название *согласованного*. Обозначив среднее значение напряжения на выходе выпрямительной группы  $U_{dв}$ , а на выходе инверторной группы соответственно  $U_{dи}$ , из условия  $U_{dв} = -U_{dи}$  получаем

$$U_{d0} \cos \alpha_{в} = -U_{d0} \cos \alpha_{и}, \quad (7)$$

где  $\alpha_{\text{в}}$ ,  $\alpha_{\text{и}}$  — углы управления выпрямительной и инверторной групп соответственно.

Из соотношения (7) следует

$$\cos \alpha_{\text{в}} = -\cos \alpha_{\text{и}} = \cos(\pi - \alpha_{\text{и}}) \quad (8)$$

или

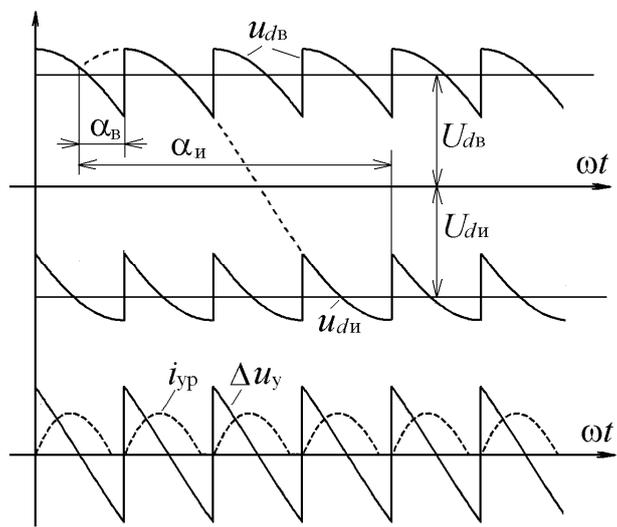
$$\alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{и}} = \pi. \quad (9)$$

Выражение (9) определяет алгоритм согласованного управления группами реверсивного ТП.

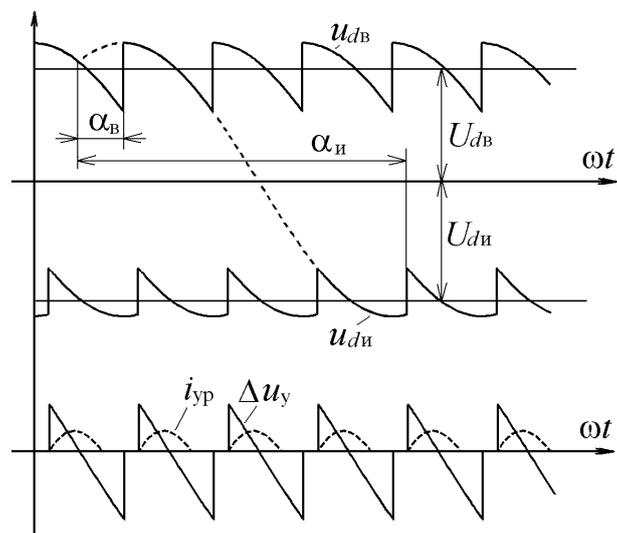
Равенство средних значений напряжений на выходе выпрямительной и инверторной групп не исключает различий их мгновенных значений. В качестве примера на рис. 13, а показаны временные диаграммы, отражающие изменение выходного напряжения реверсивного ТП при совместном управлении группами вентиляей. Каждая группа выполнена по трехфазной мостовой схеме. На рисунке кривая, отражающая изменение выходного напряжения выпрямительной группы  $u_{\text{дв}}$ , соответствует углу управления  $\alpha_{\text{в}} = 30^\circ$ , а напряжения инверторной группы  $u_{\text{ди}}$  — углу управления  $\alpha_{\text{и}} = 150^\circ$ . При этом, как следует из сказанного выше, обеспечивается равенство средних значений напряжений обеих групп, т. е.  $U_{\text{дв}} = U_{\text{ди}}$ .

Однако в контуре, образованном выходными цепями обеих групп вентиляей, возникает так называемое уравнительное напряжение  $\Delta u_{\text{у}} = u_{\text{дв}} + u_{\text{ди}}$ , где  $u_{\text{дв}}$ ,  $u_{\text{ди}}$  — выходные напряжения выпрямительной и инверторной групп соответственно. Уравнительное напряжение вызывает протекание импульсов уравнительного тока  $i_{\text{ур}}$ , форма которых зависит от характера суммарного сопротивления контура замыкания этого тока. Чаще всего суммарное сопротивление является преимущественно индуктивным, поэтому уравнительный ток протекает как при положительных значениях напряжения  $\Delta u_{\text{у}}$ , когда ток  $i_{\text{ур}}$  нарастает, а индуктивность контура запасает электромагнитную энергию, так и частично при отрицательных значениях, когда ток  $i_{\text{ур}}$  спадает, а индуктивность отдает запасенную ранее энергию.

Для уменьшения уравнительного тока используют *нелинейное согласование* работы групп вентиляей, при котором среднее значение напряжения на выходе инверторной группы превышает среднее значение напряжения на выходе выпрямительной группы.



a



b

Рис. 13

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы соотношение между углами управления выпрямительной  $\alpha_{в}$  и инверторной  $\alpha_{и}$  групп было следующим:

$$\alpha_{в} + \alpha_{и} > \pi. \quad (10)$$

Пример нелинейного согласования групп вентилях показан на временных диаграммах (рис. 13, б). Сумма углов  $\alpha_{в} + \alpha_{и}$  может быть разной. При некотором соотношении углов  $\alpha_{в}$  и  $\alpha_{и}$  можно добиться полного устранения уравнивающего тока в статическом режиме работы ТП, т. е. при неизменных значениях выходных напряжений  $U_{дв}$  и  $U_{ди}$ . Однако в переходных режимах, т. е. при одновременном изменении напряжений  $U_{дв}$  и  $U_{ди}$  (например, при реверсе преобразователя) динамический уравнивающий ток может оказаться значительным. Для ограничения динамического уравнивающего тока в контур его замыкания обычно включают дополнительные уравнивающие реакторы. В реверсивных мостовых встречно-параллельных схемах используют четыре реактора P1 – P4, как показано на рис. 12, б.

### 3. Непосредственные АС–АС-тиристорные преобразователи частоты

Непосредственные преобразователи частоты (НПЧ) обеспечивают однократное преобразование электрической энергии сети переменного напряжения в регулируемое по амплитуде и частоте. В них выходное напряжение формируется из участков синусоид сетевого напряжения, поэтому выходной сигнал имеет пониженную частоту по сравнению с частотой питающей сети. Нагрузка через открытые ключи преобразователя оказывается непосредственно подключенной к источнику питания. Эти преобразователи строятся на основе рассмотренных ранее реверсивных тиристорных преобразователей (управляемых выпрямителей). Принцип построения и работы НПЧ показан на рис. 14, а, временные диаграммы — на рис. 14, б и в.

Предположим, что в простейшем случае в однофазной реверсивной нулевой схеме (рис. 14, а), работающей на активную нагрузку  $R$ , управляющие импульсы поочередно подаются либо на тиристоры  $VD1$  и  $VD2$ , либо на  $VD3$  и  $VD4$  в момент их естествен-

ного открывания. Тогда на выходе схемы формируется пульсирующее напряжение  $u_d$ , образованное попеременно положительными и отрицательными полуволнами напряжений на вторичных обмотках трансформатора  $u_{21}$  и  $u_{22}$  (рис. 14, б). Усредняя прикладываемое к нагрузке напряжение  $u_d$  на интервале проводящего состояния каждой пары тиристоров, видим, что при переходе от одной пары тиристоров к другой оно изменяет знак, т. е. является разнополярным (обозначено как  $U_d$ ).

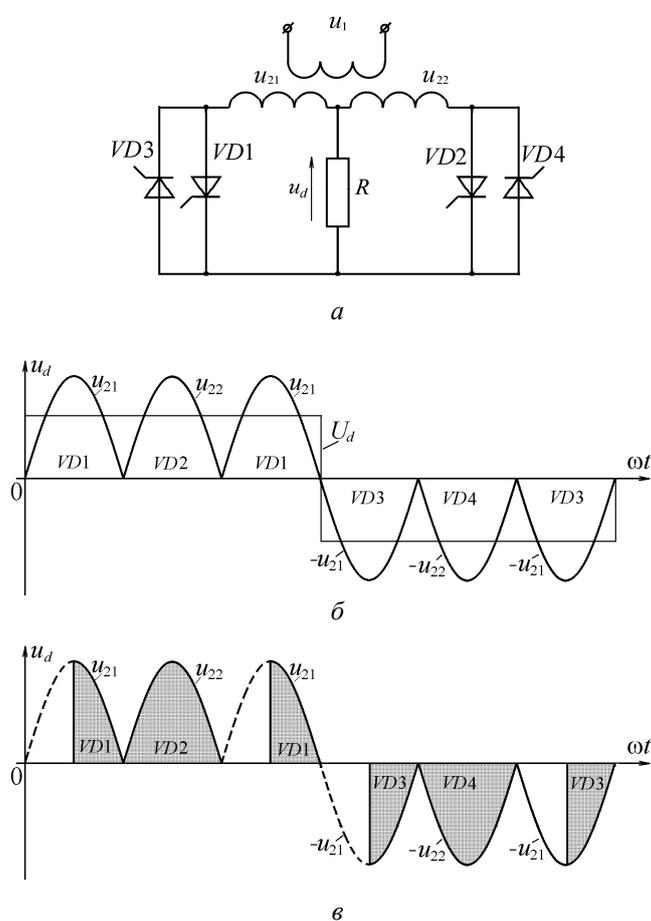


Рис. 14

Форма кривой напряжения  $U_d$  в данном случае близка к прямоугольной. При этом частота его изменения определяется количеством полуволн напряжений вторичных обмоток трансформатора, прикладываемых к нагрузке на интервале проводящего состояния каждой пары тиристоров, а амплитуда зависит от угла управления импульсов  $\alpha$ , подаваемых на тиристоры.

Обычно прямоугольная форма среднего напряжения на выходе преобразователя  $U_d$  не является рациональной для электропривода. Приближения ее к синусоиде можно достичь, соответствующим образом изменяя фазу управляющих импульсов, подаваемых на тиристоры (например, как показано на рис. 14, в). Для снижения пульсаций мгновенного значения напряжения на нагрузке и получения максимально возможной амплитуды гладкой составляющей выходного напряжения НПЧ в электроприводе обычно выполняют на базе многофазных (чаще трехфазных) схем реверсивных управляемых выпрямителей.

Функциональная схема трехфазного НПЧ показана на рис. 15. Она содержит три идентичных силовых канала с выходными напряжениями  $U_{da}$ ,  $U_{db}$ ,  $U_{dc}$ , образованных тремя реверсивными выпрямителями РВГ 1 – РВГ 3, как правило, при отдельном управлении группами вентилялей. На каждый выпрямитель РВГ 1 – РВГ 3 управляющие импульсы поступают от отдельных СИФУ 1 – СИФУ 3. Синхронизацию работы всех СИФУ обеспечивает общее задающее устройство, формирующее управляющие сигналы  $U_{ya}$ ,  $U_{yb}$ ,  $U_{yc}$ .

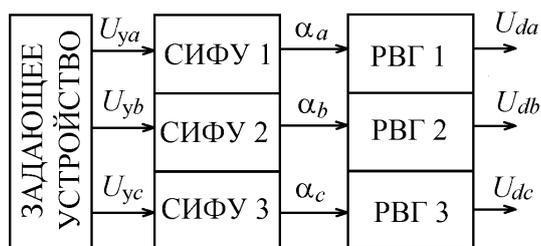


Рис. 15

При изменении по синусоидальному закону с взаимным фазовым сдвигом в  $120^\circ$  управляющих напряжений  $U_{ya}$ ,  $U_{yb}$ ,  $U_{yc}$ , подаваемых

на каждую СИФУ, на выходе преобразователя формируется трехфазное пульсирующее напряжение. В этом напряжении гладкие составляющие  $U_{da}$ ,  $U_{db}$ ,  $U_{dc}$  изменяются по синусоидальному закону с теми же частотой и взаимным фазовым сдвигом, что и напряжения  $U_{yA}$ ,  $U_{yB}$ ,  $U_{yC}$ . Необходимый для этого закон изменения углов управления  $\alpha_a$ ,  $\alpha_b$ ,  $\alpha_c$ , формируемых каждой из СИФУ, определяется следующим образом. С одной стороны, как установлено ранее, в режиме непрерывного тока управляемого выпрямителя среднее значение его выходного напряжения является косинусоидальной функцией угла управления. В частности, для фазы  $a$  можно записать

$$U_{da} = U_{d0} \cos \alpha_a. \quad (11)$$

С другой стороны, среднее значение выпрямленного напряжения на выходе каждой из фаз НПЧ должно изменяться по синусоидальному закону с некоторыми амплитудой  $U_{nm}$  и частотой  $\omega_n$ , т. е.

$$U_{da} = U_{nm} \sin \omega_n t. \quad (12)$$

Объединяя соотношения (11) и (12), получаем закон изменения угла управления вентильной группы фазы  $a$

$$\alpha_a = \arccos \frac{U_{nm}}{U_{d0}} \sin \omega_n t. \quad (13)$$

Углы управления двух других фаз ( $\alpha_b$  и  $\alpha_c$ ) связаны с углом  $\alpha_a$  очевидным образом:

$$\alpha_b = \alpha_a + \frac{2\pi}{3}, \quad (14)$$

$$\alpha_c = \alpha_a - \frac{2\pi}{3}. \quad (15)$$

При активно-индуктивной нагрузке, что обычно для электропривода, между гладкими составляющими выходных напряжения  $U_d$  и тока  $I_d$  каждой фазы появляется фазовый сдвиг. Вследствие этого возникают временные интервалы, в пределах которых напряжение  $U_d$  и ток  $I_d$  имеют противоположные знаки. В этих интервалах соответствующие тиристорные группы работают в инверторном режиме.

Особенностью НПЧ является то, что по мере увеличения частоты гладкой составляющей выходного напряжения возрастает искажение ее формы, поэтому предельное ее значение, как правило, не превышает половины значения частоты питающей сети. Для расширения диапазона регулирования частоты выходного напряжения НПЧ подключают к источнику питания повышенной частоты, например, 400 Гц.

### **КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТП**

Ввиду достаточно большого многообразия схем и режимов работы ТП в электроприводе наиболее удобным средством для практического изучения принципов их построения и характеристик служит имитационное моделирование. Развитие вычислительной техники в последние годы сделало доступным математическое моделирование при разработке и исследовании сложных электротехнических устройств. Появилась возможность воспроизведения процесса их функционирования во времени с имитацией элементарных явлений, составляющих исследуемый процесс. Чаще всего используют широко распространенный во всем мире математический пакет MATLAB с приложением Simulink. Имитационные модели в этой среде повторяют структуру реальных объектов, строятся на основе стандартных блоков из обширной библиотеки и являются по сути виртуальным лабораторным стендом. Они позволяют проводить эксперименты так же, как на реальном испытательном оборудовании, — осуществлять различные входные воздействия и регистрировать изменение во времени выходных сигналов любого функционального элемента исследуемого устройства.

Отпадает необходимость единого развернутого математического описания исследуемой системы. Оно создается автоматически вычислительной системой при запуске модели на основе структуры и параметров, входящих в ее состав блоков. Очень важное достоинство пакета заключается в простой реализации принципа агрегирования модели. Сложная модель легко представляется

в виде функционально законченных блоков — подсистем с возможностью их гибкого перестраивания и замены в зависимости от задач исследования.

Ориентированное на моделирование динамических систем приложение Simulink запускается из главного окна MATLAB нажатием на соответствующую кнопку (рис. 16), вызывающую окно библиотеки стандартных блоков Simulink, общий вид которого показан на рис. 17, а. Библиотека Simulink представляет собой набор визуальных блоков, представленных пиктограммами. Она разбита на разделы, перечисленные в левом поле окна. Содержание выделенного раздела отображается в правом поле. Библиотека оформлена в виде дерева, правила работы с ней стандартны. Большая часть блоков имеет возможность настройки параметров.

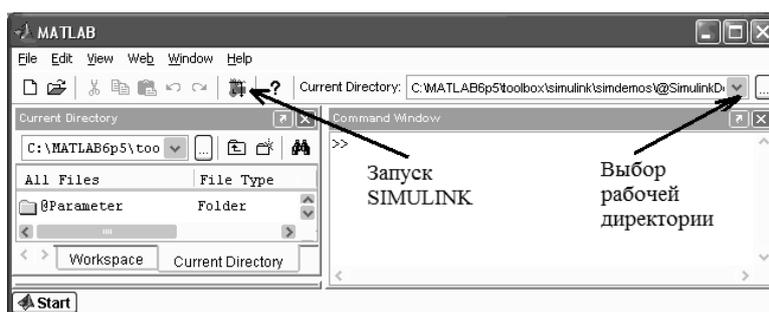
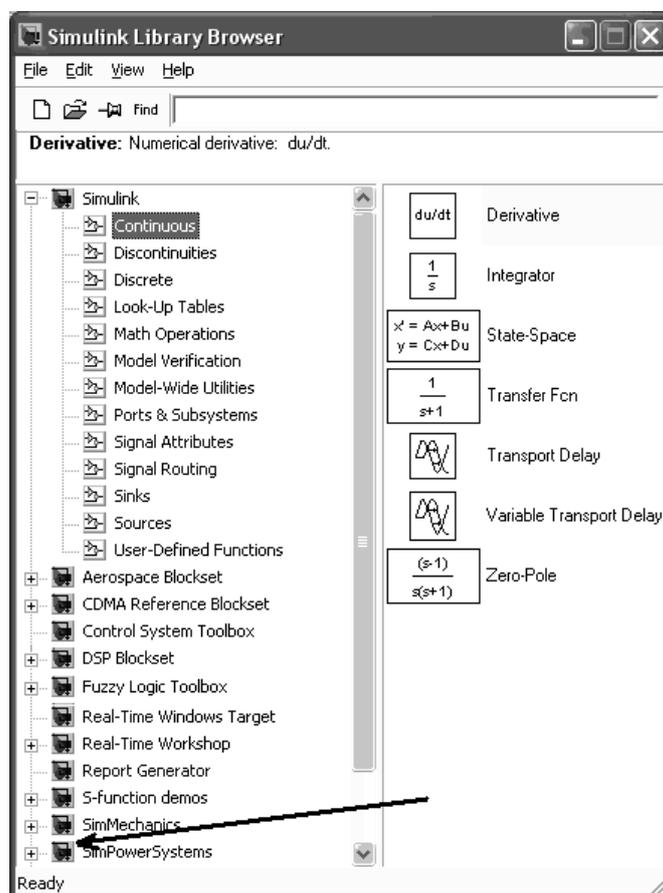


Рис. 16

Для создания модели в Simulink следует создать новый файл, выполнив команду File / New Model или нажав на соответствующую кнопку панели инструментов. В появившееся пустое окно копируют стандартные блоки из соответствующих разделов библиотеки, которые затем выстраивают в определенной последовательности, далее задают их параметры и необходимые связи между ними с учетом характеристик и структуры исследуемого устройства, наглядности и удобства проведения модельных экспериментов.

После построения модели задают параметры расчета: время и способ моделирования (Type), переменный или фиксирован-

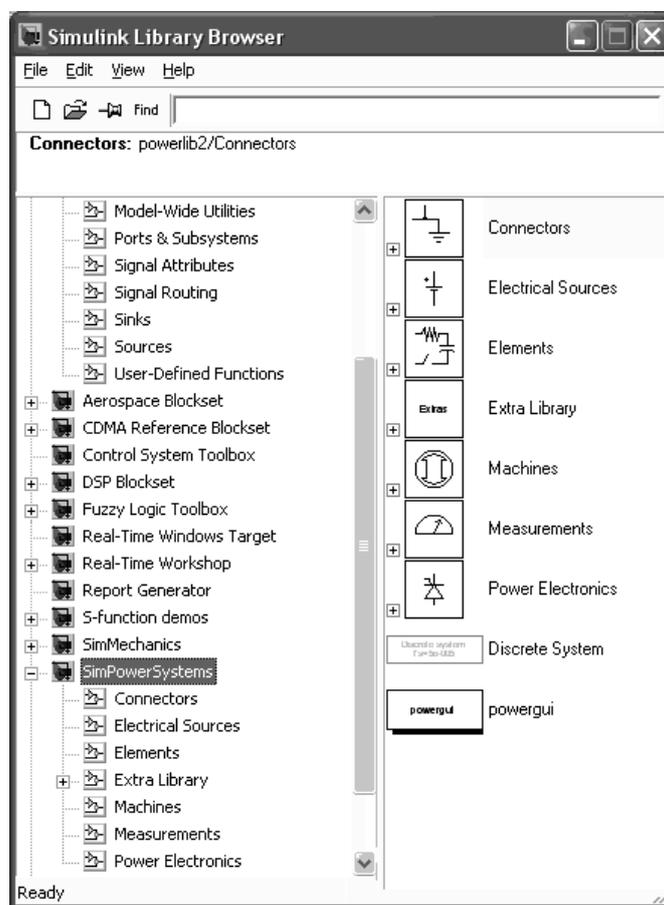
ный шаг интегрирования, метод решения дифференциальных уравнений (Solver) и т. д. Список методов расчета нового состояния модели — решателей — варьируется для переменного и фиксированного шага расчета и выбирается в зависимости от особенностей модели и решаемых задач. Далее модель запускается на исполнение нажатием соответствующей кнопки на панели инструментов.



*a*

**Рис. 17** (начало)

Приложение SimPowerSystems является одним из дополнений к Simulink, расширяющих его возможности и ориентированных на моделирование силовых электрических устройств. В состав его библиотеки, внешний вид которой показан на рис. 17, б, входят модели электрических источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, полупроводниковых элементов и некоторых наиболее распространенных устройств.



б

Рис. 17 (окончание)

Методика создания моделей в SimPowerSystems повторяет методику Simulink. Отличие состоит в том, что соединительные линии в SimPowerSystems являются аналогом соединительных проводов, поэтому проходящие через них сигналы могут изменять направление, как ток или полярность напряжения в реальных устройствах. В Simulink же сигналы однонаправленные — от выхода одного блока ко входу другого. Для связи блоков Simulink с блоками SimPowerSystems используют управляемые источники тока и напряжения, а наоборот — измерители тока и напряжения. При расчете схем необходимо применять решатели, предназначенные для решения дифференциальных уравнений со скачкообразным изменением производных переменных, например, ode15s, ode23tb и др.

## ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Задание 1.** Ознакомиться со средой моделирования MATLAB — Simulink.

1. Запустить MATLAB.
2. Запустить приложение Simulink (см. рис. 16) и изучить по разделам библиотеку стандартных блоков Simulink (см. рис. 17, *a*), после чего открыть приложение SimPowerSystem (помечено стрелкой).
3. Раскрыть и изучить по разделам библиотеку стандартных блоков приложения SimPowerSystem (см. рис. 17, *b*).
4. В меню File выбрать New/Model. В появившемся окне из стандартных блоков приложений SimPowerSystem и Simulink собрать модель управляемого однофазного однополупериодного выпрямителя (рис. 18).
5. Изменяя напряжение сети, параметры нагрузки и угол включения тиристора, наблюдать осциллограммы изменения напряжения и тока нагрузки тиристора.

**Задание 2.** Исследовать однофазный мостовой управляемый выпрямитель при активной, активно-индуктивной и активно-индуктивной с противоЭДС нагрузках.

1. В окне настроек MATLAB, выбрав рабочую директорию «Тиристорные преобразователи» (см. рис. 15), открыть файл Rect\_1phase. Запустив модель на исполнение, изучить ее структу-

ру, оценить соответствие реальной схеме управляемого выпрямителя, ознакомиться с возможностями изменения настроек параметров элементов (напряжения сети, характера нагрузки, углов включения тиристоров  $\alpha$ ). Установить амплитудное значение напряжения сети 310 В.

2. Снять зависимость среднего значения напряжения на нагрузке от угла включения тиристоров (регулирующую характеристику) преобразователя  $U_{н.ср} = f(\alpha)$  при работе на активную нагрузку.

А. Сопротивление в цепи нагрузки установить  $R_n = 1$  Ом.

Б. Изменяя углы включения тиристоров выпрямителя  $\alpha$  в диапазоне  $0 \dots 180^\circ$ , фиксировать соответствующие им средние значения напряжения на нагрузке  $U_{н.ср}$ . Результаты измерений занести в соответствующую строку таблицы. Скопировать с экрана монитора осциллограмму напряжения на нагрузке при  $\alpha = 90^\circ$ .

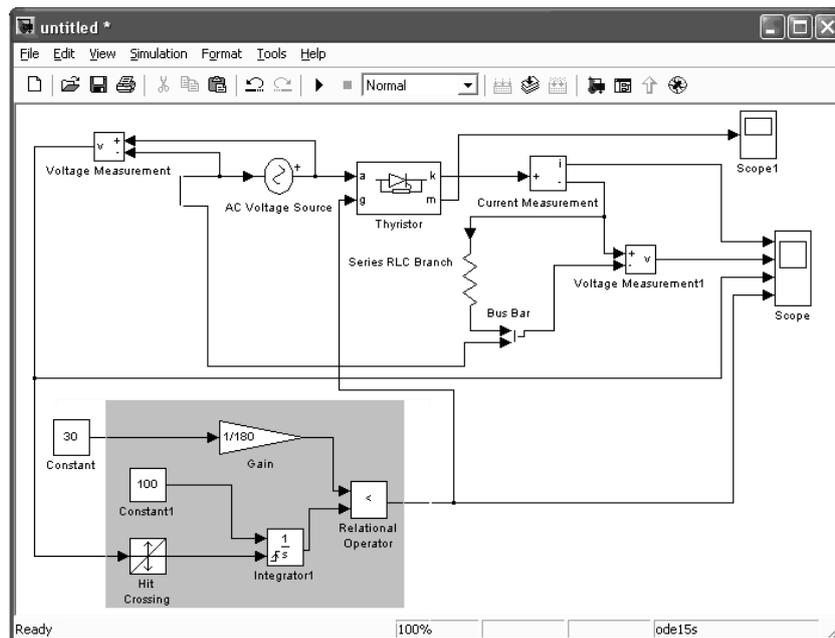


Рис. 18

3. Снять аналогичные зависимости  $U_{н.ср} = f(\alpha)$  при работе преобразователя на активно-индуктивную и на активно-индуктивную нагрузку с противоЭДС. Для этого необходимо:

а) дополнительно ввести в цепь нагрузки индуктивность  $L_n = 0,015$  Гн и постоянную ЭДС  $E = -100$  В;

б) изменяя углы включения тиристорov выпрямителя  $\alpha$  в диапазоне  $0 \dots \alpha_{max}$ , фиксировать соответствующие им средние значения напряжения на нагрузке  $U_{н.ср}$ . Результаты измерений занести в соответствующие строки таблицы. Для обоих случаев скопировать с экрана осциллограммы напряжения на нагрузке при угле  $\alpha = 90^\circ$ .

$U_{н.ср}$ , В (нагрузка $R$ )									
$U_{н.ср}$ , В (нагрузка $R-L$ )									
$U_{н.ср}$ , В (нагрузка $R-L-E$ )									
$\alpha$ , град	0	25	45	60	90	115	135	150	180

4. Построить в единой системе координат регулировочные характеристики преобразователя при разных нагрузках.

5. Сделать заключение о влиянии вида нагрузки на регулировочные возможности и характер изменения выходного напряжения управляемого выпрямителя.

**Задание 3.** Исследовать трехфазный мостовой ТП при работе на различные виды нагрузки.

1. Открыть файл Rect\_3f\_vipriamit. Запустив модель на исполнение, изучить ее структуру, познакомиться с возможностями изменения настроек параметров элементов (напряжения сети, характера нагрузки, углов включения тиристорov  $\alpha$  и т. п.).

2. Установить амплитудное значение напряжения сети 310 В. Исследовать работу трехфазного мостового ТП в режиме выпрямителя.

А. Значение сопротивления в цепи нагрузки установить  $R_n = 1$  Ом, противоЭДС  $E = 1$  В. Варьируя угол управления преобразователя  $\alpha$  в пределах  $0 \dots 120^\circ$ , наблюдать характер изменения выходных параметров преобразователя. Скопировать характерные

осциллограммы изменения тока и напряжения для значений углов  $\alpha$ , равных 0, 30, 60, 90°.

Б. Сопротивление в цепи нагрузки установить  $R_n = 1$  Ом, противоЭДС  $E = -400$  В, индуктивность 0,001 Гн. Варьируя угол управления преобразователя в пределах 0...120°, наблюдать характер изменения выходных параметров преобразователя. Скопировать характерные осциллограммы изменения тока и напряжения для значений углов управления  $\alpha$ , равных 0, 30, 60, 90°.

В. Сопротивления в цепи нагрузки установить  $R_n = 1$  Ом, значение противоЭДС  $E = -400$  В. Варьируя угол управления преобразователя  $\alpha$  в пределах 0...120°, наблюдать характер изменения выходных параметров преобразователя. Скопировать характерные осциллограммы изменения тока и напряжения для значений углов управления  $\alpha$ , равных 0, 30, 60, 90°.

Г. Сопротивление в цепи нагрузки установить  $R_n = 1$  Ом, противоЭДС  $E = -400$  В, индуктивность 0,001 Гн. Варьируя угол управления преобразователя в пределах 0...120°, наблюдать характер изменения выходных параметров преобразователя. Скопировать характерные осциллограммы изменения тока и напряжения для значений углов управления  $\alpha$ , равных 0, 30, 60, 90°.

3. Сделать заключение о влиянии вида нагрузки на работу трехфазного выпрямителя.

#### **Задание 4.** Исследовать инверторный режим работы ТП.

1. Выяснить условия перехода ТП в инверторный режим работы. Для этого необходимо:

а) открыть файл `invertor_1fl_odnopoluperiod`;

б) изменяя значения угла управления  $\alpha$  и параметров нагрузки, сделать вывод об условиях перехода схемы в инверторный режим работы;

в) выяснить условия возникновения режима опрокидывания инвертора.

2. Исследовать работу трехфазного мостового ТП в режиме инвертора. Для этого открыть файл `Rect_3f_invertor`. Сопротивление в цепи нагрузки установить  $R_n = 1$  Ом, противоЭДС  $E = 1$  В. Варьируя угол управления преобразователя в пределах 0...120°, наблюдать характер изменения выходных параметров преобразо-

вателя. Скопировать характерные осциллограммы изменения тока и напряжения для углов управления 0, 30, 60, 90°.

**Задание 5.** Исследовать работу тиристорного НПЧ.

1. Открыть файл NPCN. Предварительно запустив модель на исполнение, изучить ее структуру, оценить соответствие реальной схеме преобразователя частоты, познакомиться с возможностями изменения настроек параметров элементов (нагрузки, напряжения сети, задающего сигнала  $U_y$ , системы регулирования). Установить амплитудное значение напряжения сети 310 В, частоту изменения 50 Гц. Амплитудное напряжение задающего сигнала установить 5 В, частоту изменения 5 Гц.

2. Запустив модель на исполнение, скопировать с экрана изменение основных переменных, характеризующих работу исследуемого устройства. Повторить опыт при частотах задающего сигнала 15 и 25 Гц.

3. Сделать вывод о влиянии частоты задающего сигнала на форму напряжения и тока нагрузки.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист с названием работы, указанием группы, фамилии студента и даты выполнения.
2. Копии экрана всех исследуемых моделей.
3. Таблицы, графики, осциллограммы, расчеты и выводы в соответствии с заданием.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие функции в составе электропривода выполняют ТП?
2. Какими должны быть электрические схемы силовой части нереверсивного и реверсивного трехфазного мостового преобразователей? Изобразите их.
3. В чем проявляются особенности работы ТП на разные виды нагрузки?

4. Каковы условия получения режима непрерывного выходного тока ТП?

5. В чем состоят негативные проявления зоны прерывистых токов и какие вы знаете меры по ее ограничению?

6. Для чего используют инверторный режим работы ТП в электроприводе и как его реализовать?

7. В чем причина появления уравнивающих токов в реверсивных ТП? Какие вы знаете способы их ограничения?

8. Что такое непосредственный преобразователь частоты? Объясните принцип его работы. Как влияют частоты напряжения сети и задающего сигнала преобразователя на качество его выходного напряжения? Какие другие типы преобразователей частоты вы знаете?

## ЛИТЕРАТУРА

*Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981.

*Забродин Ю.С.* Промышленная электроника. М.: Высш. шк., 1982.

*Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб.: Корона-Принт, 2001.

*Герман-Галкин С.Г.* Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Основные теоретические сведения.....	3
1. Нереверсивные тиристорные $AC-DC$ -преобразователи.....	3
2. Реверсивные тиристорные $AC-DC$ -преобразователи .....	23
3. Непосредственные $AC-AC$ -тиристорные преобразователи частоты .....	27
Краткие сведения о программной среде для моделирования ТП .....	31
Задание и порядок выполнения работы .....	35
Содержание отчета.....	39
Контрольные вопросы .....	39
Литература.....	41

*Учебное издание*

**Красовский** Александр Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛИ  
РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

*Методические указания*

Редактор *В.М. Царев*

Корректор *Р.В. Царева*

Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

Подписано в печать 17.10.2012. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 2,56. Тираж 500 экз. Изд. № 19. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**